

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2019.04.012

面向定时节能运行的 列车牵引计算算法

代 位, 韩宝明, 周玮腾

(北京交通大学交通运输学院, 北京 100044)

摘 要: 列车牵引定时计算是轨道交通列车牵引仿真系统的重要功能模块, 对于实现列车按运行图模拟仿真运行具有重要意义。在考虑定时运行的基础上, 实现列车运行全过程能耗最小化, 则使该研究更具实际价值。在分析列车牵引计算运动学理论基础, 构建基于巡航惰行组合中间过程的列车运行定时节能仿真双层规划模型, 分析以巡航速度为能耗控制变量、以惰行点位置为运行时间控制变量的二分法求解模型的可行性及解的存在性, 设计基于二分法的列车运行定时节能优化算法。完成定时节能仿真模块的计算机程序编写, 并以广州市域快线 18 号线(规划方案)万顷沙—横沥区段做案例分析。仿真计算列车运行时间与时刻表时间误差满足精度要求, 且在能耗上求得最优解, 表明模型构建和算法设计有效, 且具有计算量少的优点。

关键词: 轨道交通; 牵引计算; 定时节能算法; 二分法; 列车运行仿真

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2019)04-0068-06

Study on Train Traction Calculation Algorithm: A Time- and Energy-saving Flow

DAI Wei, HAN Baoming, ZHOU Weiteng

(School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)

Abstract: The calculation of train traction with a timing algorithm forms an important functional module of a train traction simulation system of rail transit. It is of great significance to realize the simulation of train route progress according to the operation diagram. On the basis of the timing algorithm, this study aims to provide practical ways to minimize energy consumption in the entire train operation. Based on the kinematics theory of train traction, this study developed a time and energy-saving simulation bi-level programming model with cruising and coasting running progress and analyzed the feasibility of using dichotomy to solve the model with cruise speed as the control variable of energy consumption and the position of idle line as the control variable of running time. An optimized algorithm was also designed to minimize the time and energy of train operation. The computer programming of the simulation module of the time and energy-saving algorithm was completed; further, a case analysis of the Wanqingsha-Hengli section of Guangzhou city express line 18 (planning scheme) was conducted. The simulation calculation of train running time and schedule time error meets the requirements of accuracy, and an optimal solution is obtained based on energy consumption, which indicates that the proposed model and algorithm are effective with the advantage of fewer calculation steps.

Keywords: rail transit; traction calculation; timing and energy-saving algorithm; dichotomy; train running simulation

收稿日期: 2018-10-12 修回日期: 2018-11-20

第一作者: 代位, 男, 硕士研究生, 从事轨道交通规划与管理研究, 17120786@bjtu.edu.cn

基金项目: 交控科技设计创新和学科发展基金(9907006511); 国家重点研发计划(T18B500080)

轨道交通列车牵引计算常以节能为目标^[1-5],得到最节能的牵引策略和列车运行曲线,用于指导区间标尺的确定或修改,以及时刻表的制定。

当列车时刻表确定后,列车区间运行时间也就随之固定,此阶段列车牵引仿真计算需首先满足运行时间的要求,即达到定时运行。定时运行对于实现列车按运行图(时刻表)模拟仿真具有重要意义。一方面,定时运行可以为列车在动态客流条件下提供最优的运行策略;另一方面,定时运行可以为列车提供在延误(如站内延误)条件下的运行策略调整方案。

既有文献对于定时运行研究不多,师蔚等^[6]将列车中间运行过程设定为牵引惰行交替,通过不断调整工况转换的速度条件,来达到定时的目的;丁勇等^[7]引入目标速度的概念,牵引惰行围绕着目标速度交替,通过改变目标速度从而影响列车的运行时间;陈志杰等^[8]根据子区间类型设定工况序列,采用遗传算法求得最优序列,使得列车运行时间与时刻表时间之差最小。

在实现列车定时运行的前提下获得最节能的列车运行曲线,是研究的目的。由于轨道交通列车在实际运行过程中多采用巡航惰行组合的中间运动过程,以此过程建立列车牵引仿真模型,通过对巡航速度和惰行点位置进行优化,获得最佳的巡航速度与工况转换点,以达到定时节能运行的目的。

1 列车定时节能牵引仿真模型

1.1 列车单质点运动学模型

轨道交通列车在运动过程中,主要受牵引力、制动力和运行阻力的作用。文献[9-10]给出了各类力的计算公式。经过受力分析,列车所受合力

$$C = (F_T - F_B) - MgW_z(N)$$

式中: F_T 为牵引力, N; F_B 为制动力, N; W_z 为列车所受单位阻力, N/kN; g 为重力加速度, m/s^2 ; M 为列车总质量,包括列车质量 M_t 和乘客总质量 $N \times M_a$ (N 为列车乘客人数, M_a 为乘客平均质量),单位为 t。值得注意的是,牵引力与制动力不会同时存在,取哪一类力视具体工况而定;而列车运行阻力则存在于全过程。

将站间运行的列车视为一个质点,设列车在某时间步长的初速度为 $v_x(m/s)$,对应的初位置点为 $s_x(m)$,该步长范围内产生的机械能耗为 $e_x(kW \cdot h)$,则通过受力分析后可建立列车单质点运动学模型。

1) 列车初始和终止状态为

$$v_0 = 0, v_{end} = 0$$

$$s_0 = S_0, s_{end} = S_d$$

式中: v_0 、 v_{end} 、 s_0 、 s_{end} 分别是列车起点和终点的速度和位置; S_0 、 S_d 分别为起点站和终点站的里程。

2) 列车的运动加速度

$$a = \frac{c}{M(1+\gamma)} \times 10^{-3} (m/s^2)$$

其中, γ 为回转质量系数。

3) 牵引计算的速度-距离递推公式为

$$\begin{cases} v_{x+1} = v_x + a\Delta t \\ s_{x+1} = s_x + (v_{x+1} + v_x)\Delta t/2 \end{cases}$$

式中: v_x 为仿真第 x 步速度, m/s; s_x 为该步的位置, m; Δt 为仿真时间步长, s。

4) 列车运动机械能计算公式为

$$e_{x+1} = (F_T + F_B)(s_{x+1} - s_x)/3600$$

$$E_{x+1} = E_x + e_{x+1}$$

其中, E_x 为累计机械能消耗, kW·h。

1.2 面向定时节能的列车牵引计算仿真双层规划模型

1.2.1 模型假设

面向定时节能的列车牵引计算仿真双层模型分为节能层模型和定时层模型,其中定时层为节能层的约束。双层模型的基本假设如下:

- 1) 列车进出站时,均采用特性曲线最大值;
- 2) 列车的中间运行过程采用巡航惰行组合工况;
- 3) 惰行速度不超过巡航速度;
- 4) 区间限速单一。

按此模型假设,列车运行过程曲线如图1所示。图中 S_c 为列车开始巡航位置, S_s 为列车开始惰行位置, S_b 为列车开始制动位置。

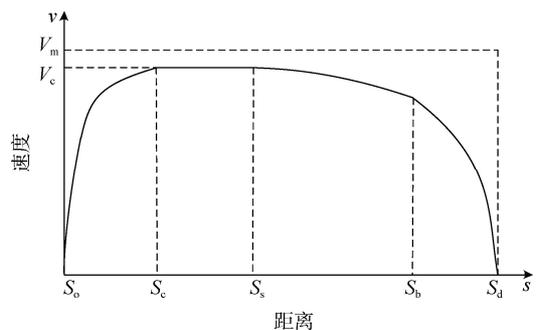


图1 列车牵引计算仿真模型运行曲线

Fig. 1 Running curve of the simulation train traction calculation model

1.2.2 节能层模型

1.2.2.1 目标函数

节能层模型以能耗最小为目标,目标函数为

$$\min Z_1 = E_x$$

式中： X 为仿真计算的总步长数； E_x 为牵引过程累计机械能消耗，kW·h。

1.2.2.2 约束条件

由于列车定时节能运行需首先保证运行时间，满足时刻表要求，节能层模型约束即为定时约束

$$|X\Delta t - T| \leq \varepsilon$$

式中： $X\Delta t$ 为仿真计算的列车运行时间； T 为时刻表规定的运行时间； ε 为时间允许误差，单位均为 s。

1.2.3 定时层模型

1.2.3.1 目标函数

以定时为目的的列车牵引计算仿真模型，目标为牵引计算仿真所得列车运行时间与时刻表时间的差值最小，且牵引能耗最低，目标函数为

$$\min Z_2 = |X\Delta t - T|$$

1.2.3.2 约束条件

1) 工况转换约束

$$\text{工况} = \begin{cases} \text{牵引} & \forall s_x \in [S_o, S_c] \\ \text{巡航} & \forall s_x \in (S_c, S_s) \\ \text{惰行} & \forall s_x \in (S_s, S_b) \\ \text{制动} & \forall s_x \in [S_b, S_d] \end{cases}$$

2) 巡航速度约束

$$\max V_c = \min \{V_m, V_{\text{设}}\}$$

式中： V_m 为区间限速； $V_{\text{设}}$ 为线路设计最高速度。

3) 全程速度约束

$$v_x \leq V_c \quad \forall s_x \in [S_o, S_d]$$

4) 工况转换点距离约束

$$S_o < S_c \leq S_s \leq S_b < S_d$$

5) 牵引/制动力取值约束

$$F_{Tx} = F_{T\max}(v) \quad \forall s_x \in [S_o, S_c]$$

$$F_{Bx} = F_{B\max}(v) \quad \forall s_x \in [S_b, S_d]$$

其中， $F_{T\max}(v)$ 和 $F_{B\max}(v)$ 分别为牵引、制动特性曲线的最大值。

6) 定时精度约束

$$|X\Delta t - T| \leq \varepsilon$$

1.2.4 模型分析

该模型以节能和定时为目标，从问题背景上看，应先满足定时的目标，而后寻找能耗最低的解，属于双层规划模型。节能层的约束实际上就是定时层的目标。定时层约束中 1)、3)、5)满足模型假设条件，2)满足线路及车辆条件，4)是运行里程的逻辑约束，

6)避免得到不满足精度的解。

由于模型计算分工况进行，改变工况转换点如巡航点 S_c 、惰行点 S_s 、制动点 S_b 均可改变计算结果。而当巡航速度 V_c 确定后，巡航点 S_c 可以确定；制动点 S_b 由制动反算得到，实际上受惰行和制动过程的控制。所以可通过控制巡航速度 V_c 与惰行点 S_s 来优化运行时间 $X\Delta t$ 和累计能耗 E_x 。这是设计求解模型定时节能算法的基本思路。

2 列车定时节能运行优化算法

2.1 定时层模型求解的可行性

2.1.1 确定巡航速度条件下定时解的唯一性

图 2 所示为列车运行曲线。假设在巡航速度 V_c 下，存在一个惰行点 S_s ，使列车在 S_s 点开始惰行，经过惰行曲线 D (黑色)再制动进站，运行时间恰好为时刻表时间 T 。

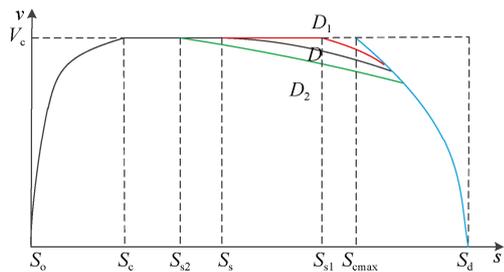


图 2 列车运行曲线

Fig. 2 Train running curve

若增大惰行点至 S_{s1} ，则惰行曲线如 D_1 (红色)所示。对比惰行曲线 D_1 与 D ，当列车处于相同的位置时，列车附加阻力相等；而曲线 D_1 的速度大于曲线 D ，所以 D_1 上列车基本运行阻力较大，使得列车减速度较大，即 D_1 较 D 下降更快。但是，若 D_1 与 D 相交，列车基本运行阻力和附加阻力都相等，此后两曲线便会重合。这表明曲线 D_1 始终在曲线 D 之上或最终重合，所以曲线 D_1 的列车平均运行速度大于曲线 D ，从而提高全过程平均运行速度，减小列车运行时间。

若减小惰行点至 S_{s2} ，则惰行曲线如 D_2 (绿色)所示。同上分析，此时曲线 D_2 的列车平均运行速度小于曲线 D ，从而降低全过程平均运行速度，增大列车运行时间。

以上分析表明，在确定巡航速度 V_c 的情况下，若存在满足运行时间的惰行点 S_s ，则该点是唯一的。

2.1.2 定时解的存在性判断条件

解的唯一性证明过程，前提是在确定巡航速度 V_c

的条件下。现在讨论是否存在这样的巡航速度 V_c 。

列车制动反算时,反向牵引至巡航速度 V_c 时交点对应位置为 S_{cmax} 。显然,列车巡航至 S_{cmax} 就必须制动,否则无法进站,此时就无惰行过程。通过上文判断可知,列车在牵引结束点(即巡航起始点) S_c 处切换惰行时,运行时间最长,记为 t_c ;在 S_{cmax} 处切换惰行时,运行时间最短,记为 t_{cmax} 。所以,在巡航速度 V_c 时,列车运行时间范围为 $[t_{cmax}, t_c]$ 。

若提高列车巡航速度至 V_{c1} , $V_{c1} > V_c$, 列车运行时间范围为 $[t_{cmax1}, t_{c1}]$;若降低列车巡航速度至 V_{c2} , $V_{c2} < V_c$, 列车运行时间范围为 $[t_{cmax2}, t_{c2}]$ 。显然,存在如下关系:

$$\begin{cases} t_{cmax1} < t_{cmax} < t_{cmax2} \\ t_{c1} < t_c < t_{c2} \end{cases}$$

若时刻表时间 T 满足 $T \in [t_{cmax}, t_c]$, 则表明在巡航速度 V_c 条件下存在且只有一个最优解。若 $T < t_{cmax}$, 表明此时巡航速度偏小,列车运行时间偏长,应提高巡航速度,使得 $T \in [t_{cmax1}, t_{c1}]$;若 $T > t_c$, 表明此时巡航速度偏大,列车运行时间偏短,应降低巡航速度,使得 $T \in [t_{cmax2}, t_{c2}]$ 。若对于最大的巡航速度 $V_c = \min \{V_m, V_{kj}\}$ 仍存在 $T < t_{cmax}$, 则表明限速或车辆构造速度不合理(偏小),或者时刻表给定时间不合理(偏小)。

2.2 节能层模型求解方法

上文分析指出,若某一巡航速度 V_c 存在定时解,则该解唯一,那么对应的能耗也是唯一的。不过,由于列车巡航速度可以在一定范围内变动,可能存在多个巡航速度 V_c 满足 $T \in [t_{cmax}, t_c]$, 这样就存在多个 $\{V_c, S_s\}$ 组合可求得定时解,以及对应的能耗值。这一组解 $\{X\Delta t, E_x\}$ 中能耗最低的值,即为模型所求。

2.3 基于二分法的列车定时节能优化算法设计

由于定时层模型在巡航速度 V_c 下存在唯一解,所以可采用二分法设计定时层模型求解。二分法寻优的基本思想是,通过不断地把最优点所在区间一分为二,使区间两端点逐步逼近最优点,进而不断迭代计算直至找到最优点。

基于二分法的列车定时节能运行优化算法,目的在于找到不同巡航速度 V_c 下最优的惰行点 S_s ,使得列车运行时间与时刻表时间差距最小,最终获得既定时又节能的列车运行曲线。关键在于确定惰行点 S_s 的左右端点 S_{left} 和 S_{right} ,通过不断迭代更新左右端点的值

来逼近最优的惰行点。算法设计流程如下:

步骤 1: 数据初始化,巡航速度迭代次数标记 $y = 0$,惰行点迭代次数标记 $z = 0$,巡航速度 V_c^y 为其最大值,即 $V_c^y = \min \{V_m, V_{kj}\}$,取一较小正数为时间允许误差 ε ,取一正整数为巡航速度调节值 V_t 。

步骤 2: 解的存在性判断。调用仿真计算器计算巡航速度 V_c^{yz} 对应的运行时间上下限 $[t_{cmax}^y, t_c^y]$,若 $T \in [t_{cmax}^y, t_c^y]$,转入步骤 3;若 $T > t_c^y$, $V_c^y = V_c^y - V_t$, $y = y + 1$,重复本步;若 $T < t_{cmax}^y$,如 $y = 0$ 则提示“请检查限速或时刻表时间是否合理”,结束计算;如 $y \neq 0$ 则提示“已计算完全部惰行速度”,转步骤 9。

步骤 3: 左右端点初始化。置 $S_{left}^{yz} = S_c^y$, $S_{right}^{yz} = S_{cmax}^y$, $S_s^{yz} = (S_{left}^{yz} + S_{right}^{yz})/2$,转入步骤 4。

步骤 4: 调用仿真计算器计算惰行点 S_s^{yz} 条件下的用时 $X\Delta t$,转入步骤 5。

步骤 5: 若 $|X\Delta t - T| \leq \varepsilon$,转入步骤 7;否则转入步骤 6。

步骤 6: 若 $X\Delta t < T$,减少巡航过程以提前惰行点位置, $S_{right}^{yz} = S_s^{yz}$, $S_s^{yz} = (S_{left}^{yz} + S_{right}^{yz})/2$, $z = z + 1$,转入步骤 4;若 $X\Delta t > T$,增加巡航过程以推后惰行点位置, $S_{left}^{yz} = S_s^{yz}$, $S_s^{yz} = (S_{left}^{yz} + S_{right}^{yz})/2$, $z = z + 1$,转入步骤 4。

步骤 7: 输出对应运行时间 $X\Delta t$ 和能耗 E_x 相关数据及对应运行曲线,转步骤 8。

步骤 8: $V_c^y = V_c^y - V_t$, $y = y + 1$,转步骤 2。

步骤 9: 将所得全部巡航速度 V_c^y 对应的能耗解排序,输出最小值为最优解,结束计算。

定时算法流程如图 3 所示。

3 案例分析

3.1 案例基本情况与数据

选取案例为广州市域快线 18 号线(规划方案)万顷沙—横沥区段。该区段全长 7 858 m,区段最高限速为 155 km/h,时刻表规定区段运行时间为 237 s。该线运用动车组,选用时速为 160 km 的城际动车组,8 节编组(6M2T)。动车组部分参数与仿真参数见表 1。

3.2 仿真测试效果

算法在自主开发的“轨道交通列车牵引仿真系统”中“巡航定时计算”模块实现。系统开发环境为 Visual Studio 2017,搭载数据库 Microsoft Access 2016,程序采用 C#语言编写。

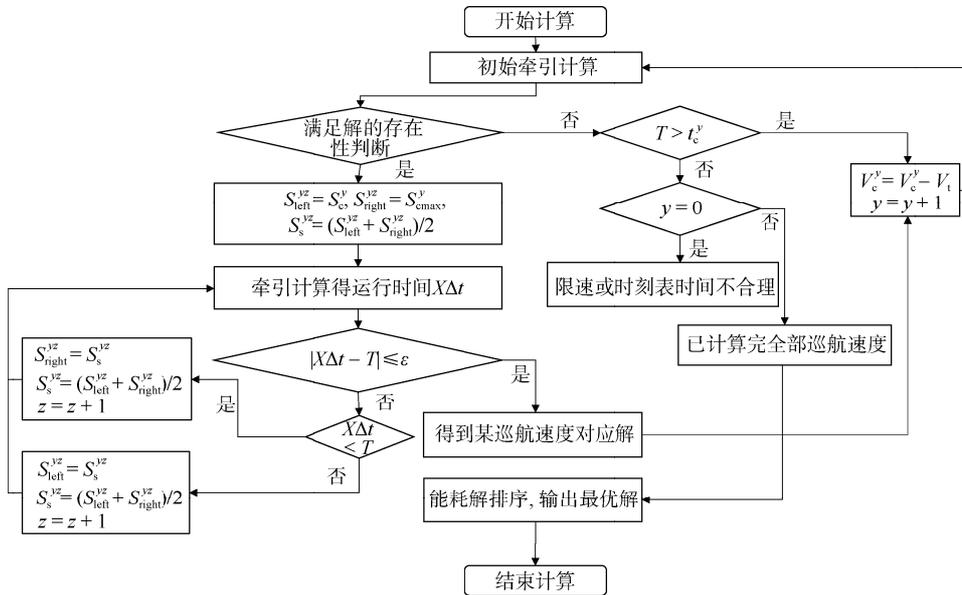


图 3 定时算法流程

Fig. 3 Flow chart of timing algorithm

表 1 动车组部分参数与仿真参数

Tab. 1 EMU and simulation parameters

动车组部分参数		仿真参数	
基准阻力参数 a	5.4	列车乘客数 N /人	1 000
滚动阻力参数 b	0.009 8	乘客平均质量 M_a /kg	60
空气阻力参数 c	0.001 63	回转质量系数 γ	0.08
列车长度 l /m	197.9	重力加速度 g /(m/s ²)	9.81
列车自重 M_t /t	274	仿真时间步长 Δt /s	0.1
列车定员/人	1 270	时间允许误差 ε /s	1
		巡航速度调节值 V_t /(km/h)	1

案例系统仿真计算界面如图 4 所示。案例仿真获得最优解如下：巡航速度为 147 km/h，惰行点位置为 4 361.69 m，区间运行时间 238.0 s，与时刻表误差绝对值为 1.0 s，全程机械能耗为 190.74 kW·h。

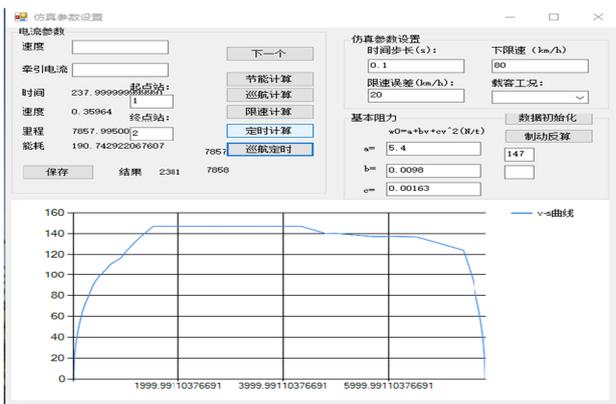


图 4 系统仿真计算界面

Fig. 4 System simulation calculation interface

3.2.1 定时优化效果

通过系统调试，巡航速度为 155 km/h 时，定时计算每次优化迭代过程中，列车运行时间偏离时刻表时间程度和误差变化趋势见图 5。可以看出，运行时间不断趋向时刻表时间，误差不断趋向于 0，计算过程存在明显的优化效果，表明该算法的设计有效。

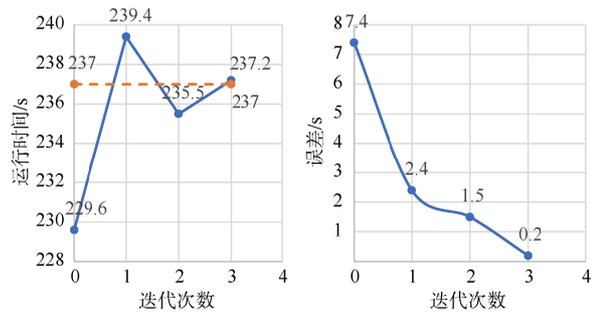


图 5 迭代过程列车运行时间偏离时刻表时间程度和误差变化趋势

Fig. 5 Deviation of train running time from schedule time and variation trend of errors in the iterative process

列车牵引仿真计算，计算量主要存在于调用仿真计算器过程中。设计算法遍历解空间的 14 个元素，每个元素迭代次数较少(不超过 4 次)就获得了满足精度要求的解，调用仿真计算器次数少于 60 次。而智能优化算法在每一代计算中种群均有一定数量的个体，每一个体均会调用一次仿真计算器。例如设计遗传算法求解，设定种群个体数为 p ，最大迭代次数为 g_{max} ，则调用仿真计算器次数为 $p \times g_{max}$ ；参考文献[4]的遗

传算法参数, $p=30$, $g_{\max}=150$, 调用次数为 4 500 次。相较而言, 在只考虑单目标优化情况下, 设计算法较智能优化算法具有计算量大幅减少的优越性。

3.2.2 节能优化效果

通过系统调试, 获得每一巡航速度对应的列车运行时间和机械能耗变化趋势如图 6 所示。由图 6 可知, 列车在各可能的巡航速度下均获得了定时解, 巡航速度为 147 km/h 时获得最小能耗解。该最小能耗值相较于全过程最大能耗值下降了 36.49%, 相较于最高限速对应能耗值下降了 13.94%, 显示出了良好的节能优化效果。

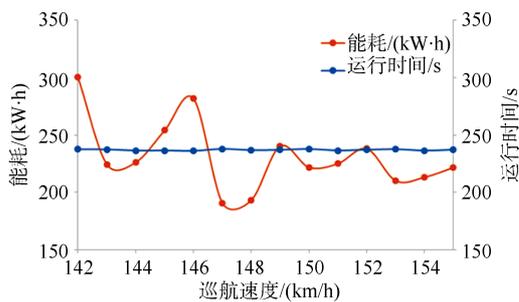


图 6 各巡航速度下列车运行时间和能耗变化趋势

Fig. 6 Variation trend of train operation time and energy consumption at different cruising speeds

4 结语

面向轨道交通列车牵引仿真系统中定时节能仿真模块的实现, 在分析列车牵引仿真计算模型的基础上, 构建了列车定时节能牵引计算仿真双层规划模型, 讨论了以巡航速度为能耗控制变量、以惰行点位置为时间控制变量的二分法实现列车运行定时节能优化的可行性, 设计了基于二分法的列车定时节能运行优化算法。在该算法的基础上, 完成了定时节能仿真模块的计算机程序编写, 并以广州市域快线 18 号线(规划方案)万顷沙—横沥区段做案例分析。仿真计算所得最优解的列车运行时间与时刻表时间误差仅为 1.0 s, 能耗较规定限速运行能耗下降了 13.94%, 表明算法设计有效, 且具有计算量少的优点。

目前所考虑的情景仅为巡航惰行的中间过程, 且列车运行只限定全程单一限速。将模型算法扩展为能适应不同工况序列组合和变化区间限速的情景, 使得仿真条件更趋向实际情况, 是后续研究的重点方向。

参考文献

[1] 崔超. 城市轨道交通列车节能运行优化研究与仿真验证[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.

- CUI Chao. Research and simulation validation of train energy saving operation optimization in urban rail transit[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [2] 王智鹏. 基于 MGASA 的城市轨道交通列车节能优化控制研究[J]. 计算机应用研究, 2014, 31(12): 3575-3579. WANG Zhipeng. Energy-saving optimization control of city railway train based on MGASA[J]. Application research of computers, 2014, 31(12): 3575-3579.
- [3] 丁勇, 刘海东, 栢赞, 等. 地铁列车节能运行的两阶段优化模型算法研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2011, 11(1): 96-101. DING Yong, LIU Haidong, BAI Yun, et al. A two-level optimization model and algorithm for energy-efficient urban train operation[J]. Journal of transportation systems engineering and information technology, 2011, 11(1): 96-101.
- [4] 马超云, 丁勇, 杜鹏, 等. 基于遗传算法的列车节能运行惰行控制研究[J]. 铁路计算机应用, 2010, 19(6): 4-8. MA Chaoyun, DING Yong, DU Peng, et al. Study on coast control of train movement for saving energy based on genetic algorithm[J]. Railway computer application, 2010, 19(6): 4-8.
- [5] 石红国, 彭其渊, 郭寒英. 城市轨道交通牵引计算算法[J]. 交通运输工程学报, 2004, 4(3): 30-33. SHI Hongguo, PENG Qiyuan, GUO Hanying. Traction calculation of urban mass transit[J]. Journal of traffic and transportation engineering, 2004, 4(3): 30-33.
- [6] 师蔚, 张舟云, 方宇. 定时约束下城市轨道交通列车节能牵引算法的研究[J]. 计算机应用与软件, 2010, 27(10): 72-75. SHI Wei, ZHANG Zhouyun, FANG Yu. On Algorithm of energy-saving traction for urban rail train with timing constraints[J]. Computer applications and software, 2010, 27(10): 72-75.
- [7] 丁勇, 毛保华, 刘海东, 等. 定时约束条件下列车节能操纵的仿真算法研究[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(10): 2241-2244. DING Yong, MAO Baohua, LIU Haidong, et al. An algorithm for energy-efficient train operation simulation with fixed running time[J]. Journal of system simulation, 2004, 16(10): 2241-2244.
- [8] 陈志杰, 毛保华, 栢赞, 等. 城市轨道交通追踪列车定时节能操纵优化[J]. 铁道学报, 2017, 39(8): 10-17. CHEN Zhijie, MAO Baohua, BAI Yun, et al. Optimization on energy-efficient operations for trailing train in urban rail system with fixed run-time[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(8): 10-17.
- [9] 饶忠. 列车牵引计算[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2010. RAO Zhong. Tracking traction calculation[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2010.
- [10] 列车牵引计算规程: TB/T 1407 1998[S]. 北京: 中华人民共和国铁道部, 1998: 5. Train traction calculation procedures: TB/T 1407-1998[S]. Beijing: Ministry of Railways, People's Republic of China 1998: 5.

(编辑: 王艳菊)